

基于关键断面辨识的复杂级联电网日前调度优化

李琦¹, 陈艺华¹, 郭斌¹, 张德亮², 郭少青²

(1. 国网陕西省电力公司电力调度控制中心, 陕西 西安 710049;

2. 北京清大科越股份有限公司, 北京 100102)

摘要:为解决新能源最大化消纳与预留运行断面潮流裕度之间的矛盾,实现电网运行效益提升、促进清洁能源消纳和确保电网安全稳定运行三项目标间的有序协调,提出了一种基于关键断面辨识的复杂级联电网日前协调优化方法。统筹考虑新能源与负荷两方面主要不确定性因素,提出了级联电网中断面越限风险评价指标,以辨识制约新能源消纳的关键断面。在坚持全局协调优化的基础上,根据关键断面分布,合理预留各调度机构的运行断面潮流调节资源。以新能源消纳和系统运行效益最大化为目标,并考虑关键断面调节能力充裕性等约束条件进行模型优化。结果表明:该方法能够有效实现安全、经济、清洁等目标有序衔接,在提升运行断面潮流安全性的基础上,有效提升级联电网系统的清洁能源消纳能力。

关键词:级联电网;日前调度;关键断面;新能源消纳

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23177

A Day-ahead Dispatching Optimization Method for Complex Cascaded Power Grid Based on Key Section Identification

LI Qi¹, CHEN Yihua¹, GUO Bin¹, ZHANG Deliang², GUO Shaoqing²

(1. State Grid Shaanxi Electric Dispatch and Control Center, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

2. Beijing QU Creative Technology Co., Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between the maximum consumption of new energy and the reserved power flow margin of operation section, a day-ahead coordination optimization method for complex cascaded power grid based on key section identification was proposed to achieve the orderly coordination among the three objectives of improving the efficiency of power grid operation, promoting the consumption of new energy and ensuring the safe and stable power grid operation. An evaluation index of high-risk over-load operation section in cascaded power grid was proposed by considering two main uncertainties of new energy and power load to identify the key sections which restrict the consumption of new energy. On the basis of insisting on global coordination and optimization, the power flow regulation resources for operation sections of each dispatch mechanism are reasonably reserved according to the distribution of key sections. The optimization model takes the maximization of new energy consumption and power system operation benefit as the optimization goal and considers the constraints including the sufficient adjustment capacity for key sections. The results show that this method can effectively realize the orderly connection of the goals of safety, economy and cleanliness, and effectively upgrade the clean energy absorption capacity of the connected power grid system by improving the power flow safety of the operating section.

Key words: cascaded power grid; day-ahead dispatch; key section; new energy consumption

随着我国风电、光伏为代表的新能源快速发展,电网安全稳定运行面临日益严峻的挑战^[1]。特别是我国东北、西北等新能源大规模集中接入

地区,受新能源功率预测偏差及实时运行中随机波动性影响,运行断面潮流越限问题比较突出。在确保安全的基础上充分利用通道资源,提升新

基金项目: 国家自然科学基金(51907035)

作者简介: 李琦(1970—),男,硕士,高级工程师,Email: cyh197612@163.com

通讯作者: 张德亮(1983—),男,本科,高级工程师,Email: zdl20002@163.com

能源消纳能力成为当前该领域研究的重点^[2]。

运行断面潮流不越限是电网调度优化模型的基本条件和重要约束。为降低断面阻塞对新能源消纳的影响,传统研究主要是采用充分利用储能、电动汽车等灵活性调节资源来适应新能源波动性。

文献[3-5]所研究的电动汽车、储能装置、可控负荷与新能源互动模型能够通过调整电动汽车的运行方式,提升断面利用率,但是并未细致考虑新能源自身波动性对断面安全性的影响。文献[6-7]研究了风电、光伏等新能源的波动性规律,但是对负荷波动等其他不确定性因素对断面安全的影响分析并不充分。此外,上述研究中一般将运行断面潮流限值作为优化模型约束条件限值,将导致最优运行条件下部分运行断面的潮流计划必将与其限值相等。为避免实际运行中因负荷、新能源波动造成运行断面潮流越限,必须在日前调度优化环节为各运行断面设置一定潮流裕度,并通过日内滚动计划、常规电源发电控制等方式确保裕度满足要求^[8-9]。因此,在日前调度优化领域提升新能源消纳的重要途径就是如何合理地设置运行断面潮流裕度,以实现运行断面的充分利用。

然而对如何科学设置运行断面潮流裕度的研究目前还处于起步阶段,部分文献提出根据新能源预测曲线,考虑一定波动率作为运行断面潮流裕度制定的参考^[10]。还有部分研究提出采用鲁棒调度方法,考虑新能源多场景预测对运行断面的影响^[11]。但从实际来看,往往面临裕度偏大,结果较保守,不利于新能源消纳的问题^[12]。此外,目前的研究对我国实际的运行断面特征关注较少,受资源与需求分布不均影响,我国新能源往往集中于东北、西北地区,通过特高压输电线集中送出,由此产生了级联电网这种特殊的电网形态^[13]。而当前对级联电网运行特性和控制策略的研究并不充分,对如何解决级联电网多调度机构安全协调的方法有待研究。

为此,本文将提出一种基于关键断面辨识的日前协调优化方法,以解决我国复杂级联电网中所面临的运行断面安全与新能源消纳相协调的问题。

首先,剖析我国级联电网运行特性,提出一种考虑新能源与负荷双重波动的关键断面评价标准,由此提出级联电网中基于关键断面辨识的

日前调度优化实施思路;然后,构建基于关键断面辨识的日前调度优化模型,并介绍其实施方法;最后,基于我国西北电网实际数据构造算例,验证所提出方法的有效性。

1 关键断面辨识与优化思路

1.1 级联电网运行特性

我国东北、西北等地区丰富的风光资源和东南部旺盛的用电需求决定了大量富余新能源必须长距离送出消纳,由此产生了级联电网这种特殊的电网形态^[13]。

级联电网由多级相互嵌套的运行断面构成,每级运行断面区域均接入一定量的常规电源、新能源和用电负荷。各运行断面以串联、并联、混联等多种方式组合,并可能涉及多个层级的调度机构。如图1所示的西北某级联电网中,共涵盖5级运行断面,依次为DM1, DM2, DM3, DM4, DM5,涉及网、分、省、地四级5个调度机构。

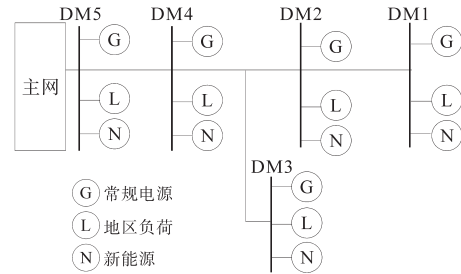


图1 级联电网示意图

Fig.1 Schematic diagram of cascaded power grid

从调度运行角度来看,级联电网运行复杂性主要体现在3个方面:

1)更突出的随机波动性。除传统的负荷波动外,级联电网新能源装机比例较高,导致与常规电网相比,具有更高的波动性;

2)更复杂的调度协调关系。级联电网一般地区广袤,且覆盖多个电压层级,往往对应多个不同层级多个调度机构,导致其业务协调量大,流程复杂^[14];

3)更显著的潮流耦合关系。负荷及新能源出力的波动可能影响多级运行断面潮流。

1.2 考虑双重波动影响的关键断面辨识

级联电网中第 os 级运行断面潮流不仅与本级电网常规电源、新能源发电出力 and 用电负荷有关,还受上一级电网注入潮流影响^[15],可表示为

$$P_{os,t} = P_{os-1,t} + \sum_{g \in os} P_{g,t} + \sum_{w \in os} P_{w,t} - \sum_{b \in os} P_{b,t} \quad (1)$$

式中: $P_{os,t}$, $P_{os-1,t}$ 分别为第 os 级运行断面和其上一

级运行断面时刻 t 的潮流; $P_{g,t}, P_{w,t}, P_{b,t}$ 分别为常规电源 g , 新能源 w 和负荷节点 b 时刻 t 的发电功率或用电负荷; $g \in os, w \in os, b \in os$ 分别表示常规电源、新能源和负荷节点均在第 os 级运行断面区域。

由式(1)可以看出,级联系统中影响各级运行断面潮流的因素主要有4个方面。其中,常规电源出力可控性和运行稳定性较高;上一级电网注入潮流受传输能力限制,正常运行过程中不超过其传输限值;用电负荷、新能源出力是运行断面潮流控制主要的不确定性来源,现有的研究中主要从两个技术路径评价其不确定性,一是根据历史预测准确率评估实时运行偏差,二是采用多场景预测、区间预测等概率预测方法来评估其影响^[16]。根据以上4个方面影响因素的分析,本文提出以预期潮流越限概率作为级联系统关键断面辨识的标准。考虑负荷及新能源双重不确定性下,第 os 级运行断面潮流分布概率函数可表示为

$$P_{os,t}(p) = P_{os-1}^{set} + \sum_{g \in os} P_g^{min} + \sum_{w \in os} P_{w,t}(p) - \sum_{b \in os} P_{b,t}(p) \quad (2)$$

式中: $P_{os,t}(p)$ 为第 os 级运行断面潮流分布概率函数; P_{os-1}^{set} 为上一级运行断面潮流限值; P_g^{min} 为常规电源 g 最小技术出力; $P_{w,t}(p), P_{b,t}(p)$ 分别为新能源 w 的出力概率函数和节点 b 的负荷概率函数。则第 os 级运行断面潮流越限概率即为其潮流超过限值的发生概率,可表示为

$$P_{os,t}^{pro} = P_{os,t} \quad P_{os,t} > P_{os}^{set} \quad (3)$$

式中: $P_{os,t}^{pro}$ 为第 os 级运行断面潮流越限概率; P_{os}^{set} 为该运行断面的潮流限值; $P_{os,t}$ 为第 os 级运行断面潮流概率函数。

可由调度运行人员根据实际运行情况,设定关键断面判定限值。潮流越限概率超过给定限值的运行断面即为本文所提出的级联电网关键断面,其判定公式可表示为

$$P_{os,t}^{pro} \geq P_{os,t}^{pro,set} \quad (4)$$

式中: $P_{os,t}^{pro,set}$ 为调度运行人员设定的判定限值。

1.3 日前调度优化改进思路

日前调度优化是电网调度运行的关键环节,所编制形成的发电计划是实时运行指挥的重要依据。级联电网自身运行控制的特殊性使得其断面裕度预留与调度协调控制均面临较大挑战。而基于关键断面辨识结果则将其协调优化提供新的思路,体现在非关键断面的偏差调节资源较充足,日前优化阶段可不考虑预留调节裕度,

依靠日内滚动计划满足调控要求;而关键断面调节资源紧张,为保障电网运行断面潮流不越限,应保障所预留的断面裕度和常规电源调节能力满足区内负荷和新能源不确定性要求。

遵循上述优化思路,本文所提出的协调优化方法具有如下特点:

1)从空间协调的角度出发,在坚持级联电网统筹协调优化的基础上,强调充分利用关键断面对应协调控制区调节资源。以关键断面为分界线,可将整个级联电网划分为多个协调控制区。各协调控制区内部运行断面调节资源相对充足,充分挖掘各控制区常规电源调节潜力,实际上就抓住了整个级联电网潮流控制的关键点;

2)从调度协调的角度出发,各协调控制区内的常规电源调节资源应优先安排在监控该控制区对应关键断面潮流的调度机构,以提升调度协调衔接效率;

3)从资源配置的角度出发,关键断面潮流裕度与对应协调控制区常规电源调节能力应满足该控制区内不确定性对关键断面的影响,并以新能源最大化消纳为目标合理配置断面裕度和常规电源调节能力。

2 复杂级联电网日前调度优化方法

2.1 优化目标

按照本文所提出的基于关键断面辨识的级联电网日前优化调度实现思路,优化模型目标函数主要考虑购电费用最小化和新能源消纳最大化两方面目标,其中新能源消纳最大化等效于级联电网弃风、弃光电量最小,因此以上优化协调模型目标为 $\min(G)$, G 为目标函数,可表示为

$$G = \alpha_1 F_p^{fee} + \alpha_2 E_w^{Loss} \quad (5)$$

式中: F_p^{fee}, E_w^{Loss} 分别为级联电网系统购电成本和弃风、弃光电量; α_1, α_2 分别为两个目标项的权重系数。

考虑到新能源优先消纳要求,购电成本重点考虑级联系统外购电费用和自身常规电源购电费用,可表示为

$$F_p^{fee} = \sum_{g=1}^{N^G} \sum_{t=1}^{N^T} P_g^G P_{g,t} \Delta T + \sum_{t=1}^{N^T} p^0 P_t^0 \Delta T \quad (6)$$

式中: P_g^G, p^0 分别为常规电源 g 和外购电的购电价格; P_t^0 为外购售电交换功率; N^T 为优化时段数; ΔT 为对应优化时段间隔; N^G 为级联电网中常规电源数。

弃风、弃光电量指标可表示为

$$E_w^{\text{Loss}} = \sum_{os=1}^{N^{OS}} \sum_{w \in os} \sum_{t=1}^{N^T} P_{w,t}^{\text{loss}} \Delta T \quad (7)$$

式中: N^{OS} 为级联电网中级联断面数; $P_{w,t}^{\text{loss}}$ 为新能源 w 时段 t 的弃风、弃光功率。

2.2 约束条件

所需要考虑的约束条件包括电力平衡约束、非关键断面潮流约束、关键断面潮流约束、常规电源出力范围约束、常规电源爬坡能力约束、新能源出力关系约束、关键断面潮流裕度约束,可表示为

$$P_{os,t} = P_{os-1,t} + \sum_{g \in os} P_{g,t} + \sum_{w \in os} P_{w,t} - \sum_{b \in os} P_{b,t} \quad (8)$$

$$P_{os,t} \leq P_{os}^{\text{set}} \quad (9)$$

$$P_{os,t} + P_{os,t}^{\text{mar}} \leq P_{os}^{\text{set}} \quad (10)$$

$$P_g^{\text{min}} \leq P_{g,t} \leq P_g^{\text{max}} \quad (11)$$

$$P_g^{\text{Cmin}} \leq P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq P_g^{\text{Cmax}} \quad (12)$$

$$P_{w,t} = P_{w,t}^F - P_{w,t}^{\text{loss}} \quad (13)$$

$$P_{os,t}^{\text{mar}} + \sum_{g \in K_{os} \cap g \in D_{os}} P_{g,t}^A \geq P_{os,t}^{\text{pro}} \quad (14)$$

其中

$$P_{g,t}^A = \min \{ P_g^{\text{AGC}} \Delta T, P_{g,t} - P_g^{\text{min}}, P_g^{\text{max}} - P_{g,t} \}$$

式中: $P_g^{\text{max}}, P_g^{\text{min}}$ 分别为常规电源 g 发电能力上、下限值; $P_g^{\text{Cmax}}, P_g^{\text{Cmin}}$ 分别为常规电源 g 爬坡能力上、下限值; $P_{w,t}^F$ 为新能源电站 w 时段 t 的发电功率预测; $P_{os,t}^{\text{mar}}$ 为第 os 级运行断面时段 t 预留的断面潮流裕度; $P_{os,t}^{\text{pro}}$ 为考虑新能源、负荷波动影响下第 os 级运行断面潮流预期越限量; $g \in K_{os} \cap g \in D_{os}$ 为属于该关键断面优化区域 K_{os} 且由该运行断面监控调度机构调管的常规电源集合; $P_{g,t}^A$ 为常规电源 g 时段 t 的调节能力,即优化时段内最大自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 调节量,由其发电计划和 AGC 响应能力决定; min 表示取最小值; P_g^{AGC} 为常规电源 g 的 AGC 调节速率。

2.3 实施要点

本质上,本方法的实际应用建立在级联电网运行信息全局共享、统筹优化的基础上。实际应用过程中,首先,需要各调度机构分头开展新能源及负荷预测,分析其不确定性特征,并根据式(2)~式(4)所示的关键断面辨识方法确定系统中需要重点关注的关键断面;然后,各级调度机构应统一将基础数据汇总,由一级调度机构采用式(7)~式(13)所示的日前协调优化模型统一优化,确定各分区新能源和常规电源整体发电计

划;最后,各调度机构根据该整体发电计划,可进一步优化编制各调管范围各类型电源发电计划,并发布执行。

3 算例分析

3.1 基础数据

本文以我国西北某地区电网实际数据构造算例,验证所提出方法的有效性。该地区新能源及常规电源装机较高,通过 750 kV 主网架送出,除 750 kV 主网架所涉及的 4 个级联断面外,110 kV 系统还存在 3 个主要的断面。将整个级联电网区域划分为 7 个运行区,共涉及 5 个调度机构对其调度运行控制进行协调指挥。

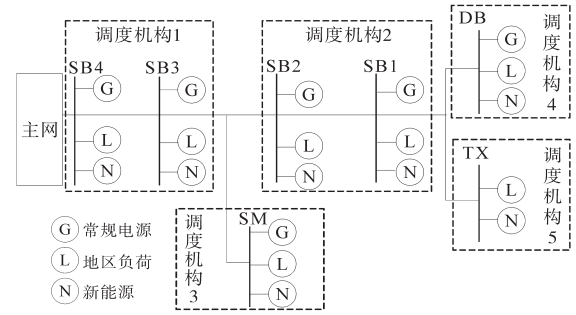


图2 级联系统网架结构

Fig.2 Cascading system grid structure

电源基本信息如表1所示。级联电网中常规电源装机容量达 15 660 MW, 新能源装机容量 24 153 MW, 新能源装机占比超过 60%, 属于高比例新能源接入电网。从购电价格来看, 运行断面 SM, DB, TX 对应区域电网最低, 运行断面 SB1, SB2, SB3, SB4 逐步增高, 最高达 0.4 元/(kW·h)。以上价格为各区域常规电源市场交易出清价, 为简化分析, 算例中取各运行区内所有常规电源的平均值。

表1 电源基本信息表

Tab.1 Basic information of power supply

断面	调管	限值/MW	常规电源/ MW	新能源/ MW	常规电源价格/ 元·(kW·h) ⁻¹
SB4	调度 1	3 600	4 580	5 600	0.4
SB3		3 800	3 400	4 230	0.35
SB2	调度 2	3 450	3 500	3 650	0.3
SB1		2 580	3 580	2 860	0.25
SM	调度 3	1 100	300	2 586	0.2
DB	调度 4	850	300	2 387	0.2
TX	调度 5	900	0	2 840	0.2

3.2 数据分析

日前计划编制阶段, 5 个调度机构分别组织开展新能源预测、负荷预测。所获得的预测曲线

分别如图3和图4所示。由于各地区新能源类型差异较大,且各地区气象条件不同,因此新能源预测曲线特性差别明显。运行断面SB1,SM,DB,TX对应区域电网光伏电源占比较高,白天整体出力较高;运行断面SB3,SB2,SB1对应区域电网风电装机比例高,逆调峰特性显著;而受气象条件影响,运行断面SB4对应区域电网新能源整体出力偏低,波动性较弱。

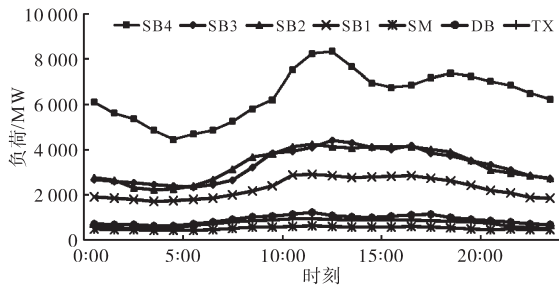


图3 系统负荷曲线

Fig.3 Power system load curves

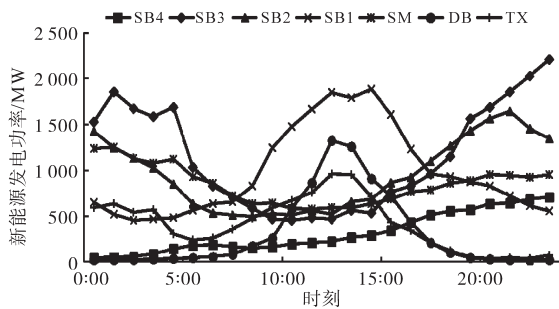


图4 新能源预测曲线

Fig.4 New energy forecast curves

各调度机构根据以上预测信息,进一步结合负荷、新能源出力不确定性,可对各时段上述7个运行断面的越限概率进行测算分析。如图5所示,各运行断面各时段的越限概率不同,其中运行断面SB3和SB1越限概率明显高于其他断面。算例中设定越限概率超过10%即为关键断面,则从00:00—09:00及17:00—23:00,运行断面SB3均属于关键断面,而12:00—15:00期间运行断面SB1属于关键断面。

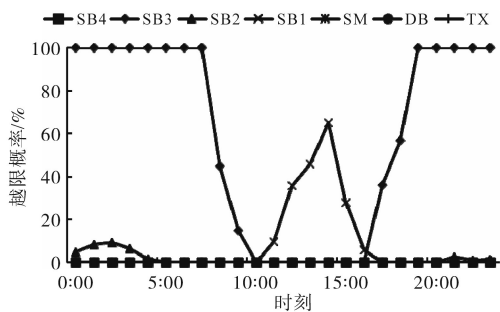


图5 运行断面越限概率

Fig.5 Out-of-limit probability of operating sections

以上信息统一汇总至调度机构1处,由调度机构1统筹调度安排。根据本文所提出的日前调度优化方法,利用式(7)~式(13)所示的日前协调优化模型优化求解可以得到各区域电网常规电源、新能源发电计划,并由此确定各运行断面的潮流分布。各区域电网常规电源发电计划如图6所示,由于未出现弃风、弃光,新能源发电计划即为其预测发电计划。

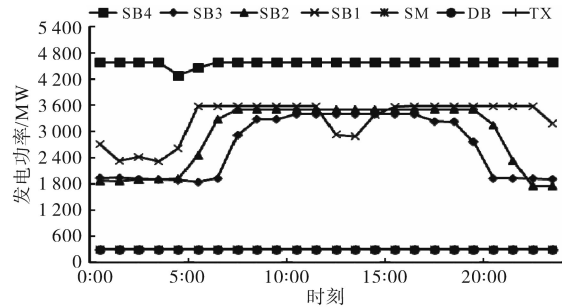


图6 常规电源发电计划

Fig.6 Conventional power generation plan

常规电源作为主要调节资源,其发电出力受运行断面传输能力、新能源发电预测、自身价格水平等因素综合影响。若无断面阻塞,则各区域常规电源应根据其自身价格依次调用,运行断面SM,DB,TX对应区域电网常规电源应优先安排发电,而在00:00—09:00及17:00—23:00,尽管运行断面SB3对应区域电网常规电源价格较高,但为了保障关键断面SB3潮流调节能力充足,该区域常规电源发电计划高于其最小技术出力,以满足新能源及负荷波动要求。同样的,在12:00—15:00期间,为满足关键断面SB1的调节要求,其对应区域电网常规电源也预留了一定调节裕度。

3.3 对比分析

为了更好地说明本文所提方法在协调系统安全性、经济性、清洁性方面的优势,进一步对比了单独优化法^[15]、不考虑关键断面调节裕度法^[16]和本文所提方法的差异。

其中,单独优化法的特征在于各调度机构以自身购电成本最低和新能源最大化消纳为目标,独立优化,而不考虑对其他调度区所产生的影响,在本算例中采用单独优化法后5个调度机构将分别优化决策,级联电网内下级调度机构将以上级调度机构优化结果作为自身优化边界。不考虑关键断面调节裕度法则仍坚持级联电网全局协调优化,但是不考虑新能源及负荷波动性影响,相当于不考虑本文所提出模型中的关键断面潮流裕度约束。

表2为运行指标对比,如表2所示,若不考虑级联电网间的资源互济,由各调度机构单独优化,不仅将造成购电成本上升还将产生弃风、弃光电量,其运行清洁性和经济性均不满足要求。与不考虑关键断面方法相比,本文所提出的优化方法未产生弃风、弃光电量,但购电成本有所上升。

表2 运行指标对比

Tab.2 Comparison of operating indicators

方法	购电成本/万元	弃风、弃光电量/(MW·h)
单独优化法	12 947	93.6
不考虑关键断面法	12 418	0
本文所提方法	12 677	0

进一步对比不考虑关键断面调节裕度与本文提出方法下关键断面调控能力差异。表3对比了运行断面SB3和SB1在其作为关键断面时段范围内潮流裕度和对应区域电网常规电源调节能力。

表3 运行断面对比

Tab.3 Comparison of operating sections

方法	SB3		SB1	
	潮流裕度/ MW	调节能力/ MW	潮流裕度/ MW	调节能力/ MW
不考虑关键断面法	0	62	0	0
本文所提方法	133	181	75	38

不考虑关键断面调节裕度时,两个关键断面的潮流计划均达到其断面限值,无潮流裕度,且所预留的常规电源调节能力偏小,特别是对关键断面SB1未预留常规电源调节能力。因此,实际上不考虑关键断面调节裕度的优化结果并不满足实际运行要求,若实际运行中出现较大波动,将导致运行断面越限的安全风险。由于缺乏对关键断面的准确辨识,调度机构只能不加区分地为各运行断面预留潮流裕度,将进一步降低新能源消纳能力。而本文所提方法则合理预留了断面潮流裕度和常规电源调节能力,以最大化方式促进整个系统的新能源消纳,从而有助于实现系统安全运行、新能源充分消纳、系统购电经济性最优等多维目标有序协调。

4 结论

为解决级联电网中清洁能源消纳问题,本文研究了新能源、负荷不确定性对运行断面的影响,提出了级联电网中断面越限风险评价指标。在坚持全局协调优化的基础上,根据指标数值确定关键断面,构建了一种基于关键断面辨识的复杂级联电网日前协调优化方法。

该方法能消除单独优化法中资源调度不充分所产生的弃风、弃光问题,同时较不考虑关键断面调节裕度法提升关键断面潮流裕度约100 MW,从而在确保运行断面潮流可控的前提下最大限度消纳清洁能源。

考虑到当前我国电力市场改革不断深入的实际需求,后续还可以进一步研究市场化下该方法的配套交易机制,以更加充分地调用级联系统中各区域调节能力,提升新能源消纳能力。

参考文献

- [1] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等.构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(6):1843-1856.
Wen Yunfeng, Yang Weifeng, Wang Ronghua, *et al.* Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856.
- [2] 辛耀中,石俊杰,周京阳,等.智能电网调度控制系统现状与技术展望[J].电力系统自动化,2015,39(1):2-8.
Xin Yaozhong, Shi Junjie, Zhou Jingyang, *et al.* Technology development trends of smart grid dispatching and control systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 2-8.
- [3] 应飞祥,徐天奇,李琰,等.含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(21):92-100.
Ying Feixiang, Xu Tianqi, Li Yan, *et al.* Research on day-to-day scheduling optimization strategy of a commercial virtual power plant with an electric vehicle charging station [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 92-100.
- [4] Mohsen Rafiee Sandgani, Shahin Siropour. Coordinated optimal dispatch of energy storage in a network of grid-connected microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3):1166-1176.
- [5] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等.考虑广义储能与火电联合调峰的日前-日内两阶段滚动优化调度[J].电网技术,2021,45(1):10-20.
Cui Yang, Zhou Huijuan, Zhong Wuzhi, *et al.* Two-stage day-ahead and intra-day rolling optimization scheduling considering joint peak regulation of generalized energy storage and thermal power [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 10-20.
- [6] 张俊涛,程春田,申建建,等.考虑风光不确定性的比例可再生能源电网短期联合优化调度方法[J].中国电机工程学报,2020,40(18):5921-5932.
Zhang Juntao, Cheng Chuntian, Shen Jianjian, *et al.* Short-term joint optimal operation method for high proportion renewable energy grid considering wind-solar uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5921-5932.
- [7] Lu Xi, Chan Kawing, Xia Shiwei, *et al.* Security-constrained multiperiod economic dispatch with renewable energy utilizing distributionally robust optimization [J]. IEEE Transactions on

- Sustainable Energy, 2019, 10(2):768-779.
- [8] 刘阳,夏添,汪咏. 区域电网内多输电断面有功协同控制策略在线生成方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7):204-210.
Liu Yang, Xia Tian, Wang Yang. On-line generation method of active power coordinated control strategy for multiple transmission sections in regional power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):204-210.
- [9] Zhou Bin, Xu Da, Li Canbing, *et al.* Optimal scheduling of bio-gas-solar-wind renewable portfolio for multicarrier energy supplies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6):6229-6239.
- [10] 田德,陈忠雷,邓英. 考虑预测误差的综合能源系统优化调度模型[J]. 太阳能学报, 2019, 40(7):1890-1896.
Tian De, Chen Zhonglei, Deng Ying. Integrated energy system optimal dispatching model considering prediction errors[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2019, 40(7):1890-1896.
- [11] 李美成,梅文明,张凌康,等. 基于可再生能源不确定性的多能源微网调度优化模型研究[J]. 电网技术, 2019, 43(4):1260-1270.
Li Meicheng, Mei Wenming, Zhang Lingkan, *et al.* Research on multi-energy microgrid scheduling optimization model based on renewable energy uncertainty[J]. Power System Technology, 2019, 43(4):1260-1270.
- [12] Ma Hongyan, Jiang Ruiwei, Yan Zheng. Distributionally robust cooptimization of power dispatch and do-not-exceed limits[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2):887-897.
- [13] 褚云龙,李秋芳,马晓伟,等. 虑复杂级联断面的多能源协调优化技术及应用[J]. 电网技术, 2020, 44(10):3656-3662.
Chu Yunlong, Li Qiufang, Ma Xiaowei, *et al.* Technology and application of multi-energy coordinative optimization with complex cascade transmission section[J]. Power System Technology, 2020, 44(10):3656-3662.
- [14] 金力,房鑫炎,蔡振华,等. 考虑特性分布的储能电站接入的电网多时间尺度源储荷协调调度策略[J]. 电网技术, 2020, 44(10):3641-3650.
Jin Li, Fang Xinyan, Cai Zhenhua, *et al.* Multiple time-scales source-storage-load coordination scheduling strategy of grid connected to energy storage power station considering characteristic distribution[J]. Power System Technology, 2020, 44(10):3641-3650.
- [15] 徐玉韬,谈竹奎,肖永,等. 基于HHT与滤波算法的风电波动平抑策略研究[J]. 电气传动, 2019, 49(2):56-60.
Xu Yutao, Tan Zhukui, Xiao Yong, *et al.* Research on wind power fluctuation mitigation based on HHT and filtering algorithm[J]. Electric Drive, 2019, 49(2):56-60.
- [16] 邵联合,李兴国. 风电场模型预测多时间尺度电压协调控制[J]. 电气传动, 2018, 48(4):41-48.
Shao Lianhe, Li Xingguo. Model predictive multi time scale voltage coordinated control of wind farms[J]. Electric Drive, 2018, 48(4):41-48.

收稿日期:2021-03-08

修改稿日期:2021-03-29